

지면효과를 받는 NACA0012 익형주위 유동장의 실험적 연구

조정현* · 김윤제**

Experimental Study of Flowfields Over a NACA0012 Airfoil with Ground Effects

J.-H. Cho*, Youn J. Kim**

Key Words: Ground Effect(지면효과), NACA0012 Airfoil(NACA0012 익형), Lift Coefficient(양력계수), Pressure Coefficient(압력계수), Angle of Attack (영각)

ABSTRACT

Experimental and numerical studies are conducted to investigate the flow field over a NACA0012 airfoil with ground effects. In experiment, the ground is simulated by a moving belt system. From the comparison between the experimental and numerical results, it is concluded that the velocity gradient over the ground plane causes the increments in pressure coefficient on lower surface of the airfoil and reduces the suction peak at the leading edge.

1. 서 론

임의의 유동장내에 물체가 존재하는 경우, 물체 주위에서는 유동 교란이 발생하게 되어 유선 형태를 변화시킨다. 이러한 유동 교란은 물체에 유체역학적인 힘을 발생시킨다. 항공기가 이·착륙하는 과정이나 WIG (Wing In Ground effect)선박과 같은 경우, 날개주위의 유동은 지면 및 수면에 의하여 구속을 받게 되고, 양력 및 모멘트의 변화를 가져온다. 이러한 현상을 지면효과(ground effects) 또는 표면효과(surface effects)라 부른다.

지면효과에 대한 연구는 Wieselsberger⁽¹⁾에 의해 시작되어 항공기 및 WIG 선박을 대상으로 많은 연구가 이루어졌다. 해석적 연구로는 등각사상법(conformal mapping)

등을 이용하여 정상상태 지면효과에 대한 여러 가지 해법들이 알려져 있다. 대표적으로는 Tomotika 등⁽²⁾의 평판 해석, 상대적으로 높은 고도에 대하여 적용되는 Green의 원형 아크(circular-arc) 익형⁽³⁾ 및 Joukowski 익형⁽⁴⁾ 해석, 그리고, 낮은 높이에 대하여 적용되는 Tuck^{(5),(6)}의 연구 등이 있다. 지면효과에 대한 수치적인 연구는 비점성 포텐셜 유동을 대상으로 한 연구가 주를 이루고 있다. Chen & Schweikhard⁽⁷⁾는 준 와동 격자법(quasi vortex lattice method; QVLM)를 이용하여 높이가 연속적으로 변하는 평판에 대한 해석을 수행하여 지면효과를 비정상 문제로 접근하였을 경우에, 양력의 증가량이 정상상태로 접근한 경우보다 크다는 결과를 발표하였다. 하지만, Chen & Schweikhard의 연구는 후류(wake)의 위치를 비행경로 위에 고정시킨 단점이 있었다. 이런 경우 고정된 후류판(wake plane)에 의하여 양력과 같은 공기역학적인 힘들이 발생하게 된다. Nuhait & Mook⁽⁸⁾는 와동 격자법(vortex-lattice method)을 이용한 비정상 지면효과를 해석하면서 후류장(wake field)이 주위

* 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : kimyj@me.skku.ac.kr

유동 조건에 의하여 자유롭게 변형될 수 있다는 조건을 추가하였다. 이후 Nuhait & Zedan,^{(9),(10)} Nuhait⁽¹¹⁾에 의해 2차원 평판, 2차원 플랩평판(flapped plate), 그리고 캠버(camber)를 가지는 평판 날개에 대한 비정상 지면효과 연구가 이루어졌다.

지면효과 실험에 있어서는 지면을 어떻게 모사할 것인가가 가장 중요한 고려사항이다. 일반적인 풍동 실험에 있어서 주된 관심사는 자유 유동과 모형 사이의 상대 운동만을 재현하는데 국한된다. 하지만, 지면효과 실험에서는 모형과 지면간의 상대운동, 그리고 자유 유동과 지면간의 상대운동 역시 고려되어야 한다. 특히, 자유유동과 지면간의 상대운동을 적절히 모사하지 못하는 경우, 지면을 모사하는 기구(mechanism)로부터 실제 유동 현상과는 상이한 경계층(boundary layer)의 발달이 형성되고 실험 결과에 오차를 발생하게 된다.

본 연구에서는 정상상태 지면효과를 받는 익형의 익형 주위의 유동 특성을 이동 벨트를 이용한 실험과 상용 CFD 프로그램을 이용한 수치해석을 병행하여 고찰하였다.

2. 실험장치

실험에 사용된 NACA0012 익형은 ABS 수지를 이용하여 제작하였으며, 익형의 익형길이(chord length)와 익폭(span)은 각각 150 mm와 300 mm이다. 익형의 상부면과 하부면에 각각 12개의 압력공을 직경 1 mm크기로 설치하였고, 익형의 전연점에 1개의 압력공을 설치하였다.

실험은 450 mm×450 mm개방식 토출형 아음속 풍동 내에 지면을 모사하기 위하여 이동 벨트 장치를 제작, 장착하여 수행하였다. Fig. 1은 시험부의 개략도이다. 벨트의 폭은 익형의 폭과 동일한 300 mm이며, 지면을 모사하는 길이는 1100 mm내외이다. 벨트의 장력을 조절하며 회전 중 벨트가 이탈하는 현상을 방지하기 위하여 롤러의 축간 거리를 조절할 수 있도록 제작하였다. 롤러는 AC 모터를 이용하여 벨트로 구동시켰으며, 고주파 발전형 근접센서(PS17-5DP, Autonics)를 이용하여 회전수를 측정하였다. 모터의 최대 회전수는 1700 rpm 이상이지만, 베어링의 내구성을 고려하여 롤러의 최대 회전수가 1500 rpm이하에서 20 m/s내외의 벨트 속도를 구현하도록 롤러의 직경을 선정하였다. 하지만, 시험가

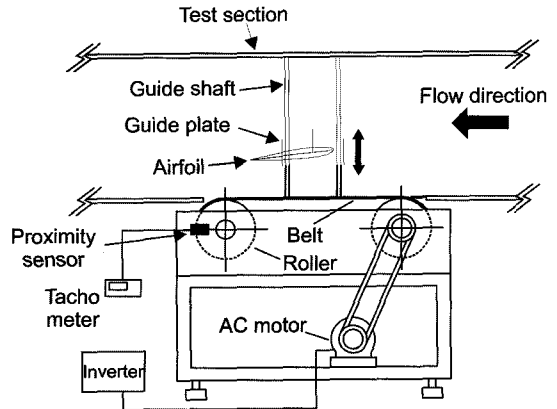


Fig. 1 Schematic diagram of test section.

동시 1100 rpm이상의 회전수에서는 전체 벨트 장치에 심한 진동이 발생하였고, 따라서 롤러의 회전 속도를 1000 rpm이하(약 15 %)로 제한하여 실험을 수행하였다. 풍동의 하부면을 절개하여 벨트로 대체하였으며, 벨트의 높이는 풍동 하부면의 높이와 일치시켰다. 벨트의 높이를 조절하는 것이 곤란하기 때문에 끝단판(end-plate)을 사용하여 익형의 높이를 조절함으로써 벨트와의 간격을 변화시켰으며, 영각 조절을 위하여 소형 DC 모터를 이용하였다. 직직도(linearity)가 1 %인 포텐쇼미터(potentiometer)로부터 전압 변동을 DAQ-보드(PCI6025E, National Instrument)를 통하여 PC로 입력받아 LabVIEW(National Instrument) 프로그램에서 연산 처리하여 모터 구동 회로를 제어하는 방식을 이용하였다.

또한, 익형 표면에서의 압력 측정은 DSA-3017 압력변환기(Scanni Valve)를 이용하여 수행하였다. DSA-3017은 16개의 압력개소에서 동시 압력 측정이 가능한 장비로써, 본 연구에서는 익형의 상부와 하부에서의 압력을 각각 측정하였다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 범용 CFD 프로그램인 CFD-ACE⁽¹²⁾를 이용하여 실험 조건과 동일한 유동장을 해석한 뒤, 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 2는 수치해석에서 사용한 격자계를 도시하고 있다. 경계 조건은 입구에서 일정 유속 조건, 출구에서 일정 압력 조건을 적용하였고, 지면에서는 입구 유속과 동일한 크기의 벽면 속도를 지정하였다. 해석 조건은 정상상태 비압축성 난류 유동을 대상으로 하였으며, 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 작동 유체는 표준

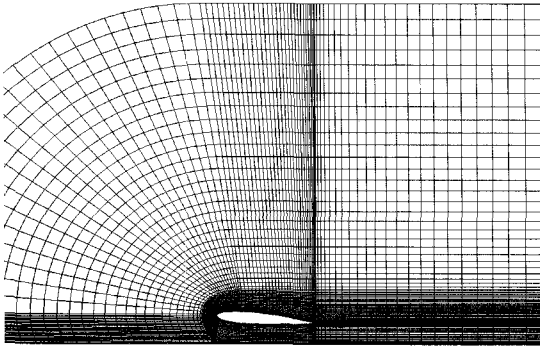


Fig. 2 Grid systems

상태 공기를 이용하였으며, 밀도 및 동점성계수는 일정하다고 가정하였다. 해석 영역의 이산화(discretization)에는 상류 도식(upwind scheme)을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

지면효과에 대한 연구에 앞서서 실험 장치의 성능 및 결과 처리에 대한 검증을 위하여 지면효과를 받지 않는 익형에 대한 실험을 선행하였다. 익형에 작용하는 양력은 익형 표면의 정압을 적분하여 계산하였다. 본 연구에서는 각각의 압력공으로부터 300개의 압력값을 측정하고, 측정값을 통계 처리하였다.

Fig. 3은 몇 가지 레이놀즈수에 대한 양력계수를 도시하고 있다. 여기서 레이놀즈수는 익형의 익현길이를 기준으로 한 레이놀즈수이다. 비록, 벨트 구동장치의 진동 때문에 높은 레이놀즈수 영역에서의 결과를 얻을 수 없었지만, 그림에서 보듯이 롤러의 회전속도가 1000 rpm

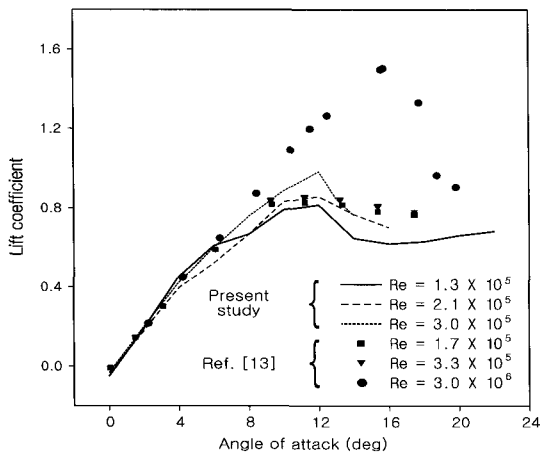


Fig. 3 Variation of lift coefficient with angle of attack for various Reynolds numbers

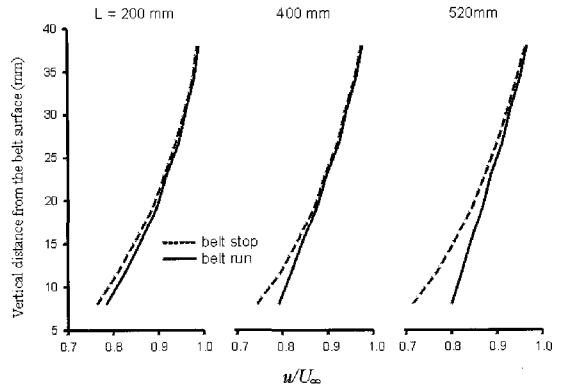


Fig. 4 Effect of moving belt on the velocity profile above the ground plane

이하에서는 기존의 실험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 시험부에 익형을 장착하지 않은 상태에서 이동 벨트 위에서의 속도분포를 측정된 결과이다. 벨트면으로부터 수직한 방향으로의 거리에 따라서 유속 u 와 풍동 단면 중앙부에서의 유속 U_∞ 의 비를 도시하고 있다.

벨트가 시작되는 곳으로부터 거리 L 이 200, 400, 520 mm인 지점에서 벨트면에서 8 mm 높이부터 측정을 수행하였으며, 실선으로 표시된 속도분포는 벨트가 U_∞ 의 속도로 회전하는 경우이고 점선은 벨트가 정지한 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 벨트가 정지한 경우에는 하류로 갈수록 유속이 점차 지연되는 것을 볼 수 있다. 벨트가 회전하는 경우에는 유속의 지연은 발생하지 않으며 약간의 유속 회복이 측정되었다. 하지만, 벨트의 앞전에서 추가적인 경계층 제어 장치를 사용하지 않았기 때문에 완전한 경계층 제거는 이루어지지 않은 것을 볼 수 있다. 본 실험에서는 $L=600$ mm인 익형의 높이를 변화시키면서 영각에 대한 양력계수의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 여기서, 익형의 높이는 $1/4$ 익현점과 지면간의 거리 h 를 익형의 익현길이 c 로 나누어준 무차원 높이를 사용하였다. 영각이 2° 인 경우에는 $h/c=1.0$ 인 경우를 제외하고 모두 지면효과가 없는 경우에 비해 양력계수가 큼을 알 수 있다. 영각이 4° 와 6° 인 경우는 전체적으로 양력계수가 지면효과가 없는 경우보다 작거나 거의 같은 것으로 측정되었다. 하지만, 8° 이상에서는 다시 지면효과를 받는 경우의 양력계수가 더 큰 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에서 한가지 더 특이할 사항은 지면효과를 받는 경우 실속 영각이 지면효과가 없는 경우에 비하여

더 작아진다는 점이다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 지면효과를 받지 않는 경우의 익형에서는 영각이 12°에서 최대 양력계수를 나타내고, 그 이후에 실속이 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 지면효과를 받는 경우 Fig. 5에 도시한 바와 같이 영각이 11°에서 최대 양력계수를 나타내며 12° 이전에서 이미 실속이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 지면효과를 받는 경우 실속 영각이 감소하게 되는 일반적인 경향과 일치하는 결과이다.⁽¹⁴⁾

Fig. 6은 각각의 영각에 대하여 높이 변화가 양력계수에 미치는 영향을 도시하고 있다. 지면효과가 없는 경우와 비교하여 큰 영각에서는 전체적으로 양력계수가 더 큰 값을 갖지만 작은 영각에서는 오히려 양력계수가 더 작게 측정되었다. 지면에 근접함에 따라 양력

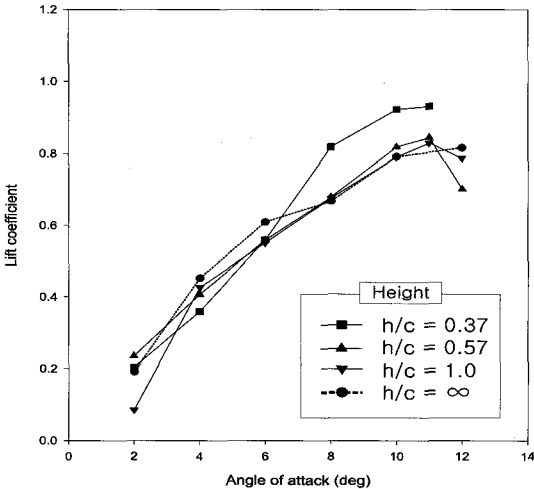


Fig. 5 Variation of lift coefficient with angle of attack for various heights

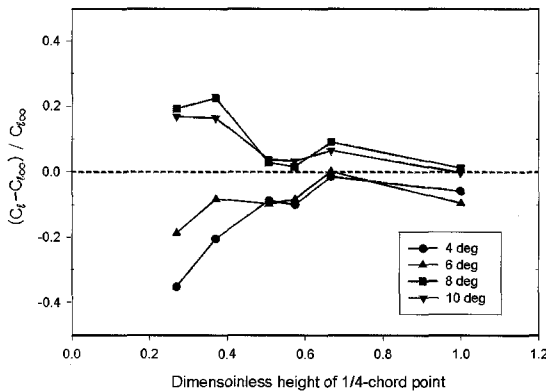


Fig. 6 Ground effects on the sectional lift increment with various angles of attack

계수는 영각에 따라 다른 경향을 나타내고 있다. 무차원 높이가 1.0인 부근으로부터 지면에 가까워짐에 따라 양력계수는 증가하다가 0.6 부근에서 전체적으로 감소하게 됨을 알 수 있다. 그 이하의 높이에서는 낮은 영각에서는 양력계수가 더욱 감소하고, 높은 영각에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 경향이 나타나는 원인을 살펴보기 위하여 Figs. 7~8에 영각이 4°, 10°인 경우에 대하여 지면과의 거리가 익형 표면에서의 압력계수 변화에 미치는 영향을 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 도시하였다. 수치해석에서는 입구 경계 조건을 적용하면서 지면으로부터 수직인 방향으로의 거리에 따라서 유속이 일정하다는 조건을 적용하였다.

영각이 4°인 Fig. 7의 경우, 실험 결과에서는 익형 상부면에서의 압력계수가 지면효과를 받는 모든 경우에 대하여 지면효과가 없는 경우보다 압력계수가 작게 계산되었다. 특히, 지면에 가까울수록 압력계수는 더 작으며, 익형의 전연 부근에서 더 많은 압력계수 감소가 나타나고 있다. 하지만, 수치해석 결과에서는 익형의 후연 부근에서는 지면에 근접할수록 압력계수가 감소하지만 전연 근처에서는 낮은 높이에서 더 높은 압력계수를 나타내고 있다. 이러한 현상은 비점성 수치해석과 상하대칭형 날개 형상에 기인한 노즐효과에 의해 발생한 것으로 판단된다.

익형의 하부면에서는 실험 결과와 수치해석 결과

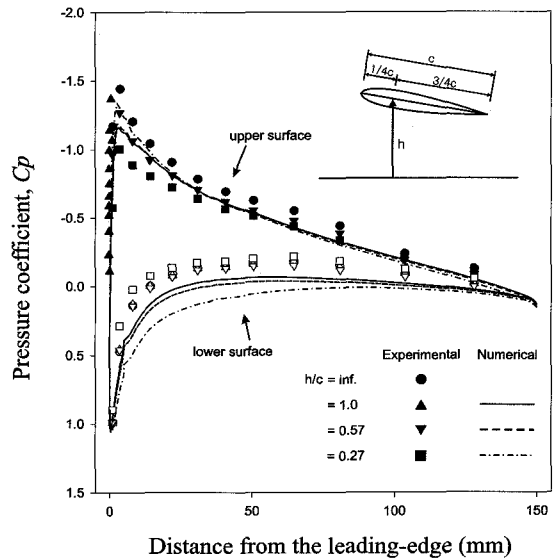


Fig. 7 Pressure coefficients distribution at $\alpha = 4^\circ$; filled symbols: upper surface; unfilled symbols: lower surface

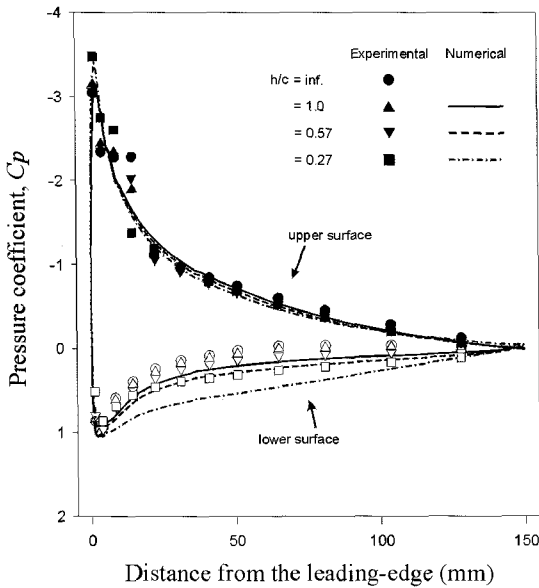


Fig. 8 Pressure coefficients distribution at $\alpha=10^\circ$; filled symbols: upper surface; unfilled symbols: lower surface

사이의 차이가 더욱 커진 것을 볼 수 있다. 실험 결과에서는 $h/c=0.57$ 에서 적은 크기의 압력계수감소가 발생하였다가 $h/c=0.27$ 에서 다시 압력계수가 증가하여, 오히려 지면효과를 받지 않는 경우보다 압력계수가 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 상부면에서의 압력계수 감소와 하부면에서의 압력계수 증가로 인하여 상부면간의 압력차가 감소하여 양력계수의 감소가 나타나지 않으며, 지면에 가까워질수록 지속적으로 압력계수가 감소하는 것을 볼 수 있다.

영각이 10° 인 Fig. 8의 실험 결과를 보면 익형의 전연에서 지면효과가 없는 경우보다 압력계수가 크게 나타나고, 그 크기는 지면에 근접할수록 증가하는 경향을 볼 수 있다. 익형의 하부로 이동하면서 전연으로부터 익현길이 약 20%이후의 영역에서는 전체적으로 지면효과를 받는 경우의 압력계수가 더 낮은 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 수치해석 결과와 대체로 일치한다. 익형 하부면의 경우에는, 전체적으로 압력계수의 크기에서는 다소의 차이가 있지만, 실험 결과와 수치해석 결과 모두에서 지면에 근접해 감에 따라 압력계수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 상부면에서는 약간의 압력계수 감소가 있었지만, 하부면에서는 확연한 압력계수 감소에 의하여 영각이 10° 인 경우에는 양력계수가 지면에 근접할수록 증가함을 알 수 있다.

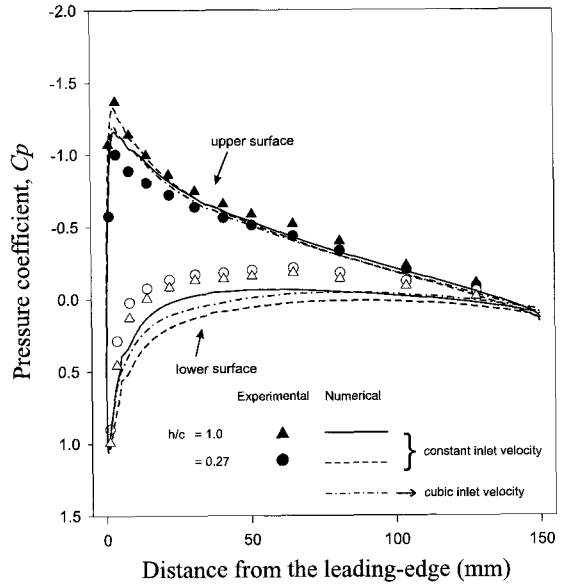


Fig. 9 Comparison of pressure coefficient distributions for different inlet condition with $\alpha=4^\circ$; filled symbols: upper surface; unfilled symbols: lower surface.

Fig. 9는 영각이 4° 인 경우 입구 경계조건을 Fig. 7과 동일한 일정 유속분포로 적용하였을 경우와 Fig. 4에 도시된 속도분포를 적용하였을 경우의 압력계수 분포를 비교하고 있다. Fig. 4의 $L=200$ mm에서 벨트가 회전하는 경우의 속도분포를 3차 방정식으로 근사하여 입구속도로 적용하였고, $h/c=1$ 과 0.27 인 경우를 비교하였다. 수치해석 결과에서 보는 바와 같이 입구속도를 3차 방정식으로 근사하는 경우의 압력계수는 일정 입구속도를 주는 경우와 비교하여 익형의 상부면에서는 더 낮게, 하부면에서는 더 높게 계산되는 것을 볼 수 있으며, 실험 결과에 근접해 가는 것을 볼 수 있다. 따라서, 낮은 영각 및 높이에서 양력계수가 감소하는 것으로 측정된 것은 지면 가까이 경계층 내부에서의 속도구배에 의한 것임을 알 수 있다. 이러한 결과는 지면을 모사하기 위하여 고정 평판을 이용하는 경우에 있어서 측정 결과에 오차가 대체할 수 있음을 시사한다. 경계층의 존재로 인한 오차는 압력계수 및 양력계수를 계산하는 과정에서도 발생할 수 있다. 압력계수와 양력계수를 계산하는 과정에서는 자유 유동의 속도 U_∞ 를 일정한 값으로 적용하지만 모형이 Fig. 4에 도시된 바와 같이 속도구배가 존재하는 영역에 포함되는 경우 계산 과정에서 오차가 발생하게 된다. Fig. 9에 도시된 $h/c=0.27$ 인 경우는 익형의 하부면이 이러한 영역에

포함되며, 수치해석에 의한 정압 분포와 압력계수 분포는 정성적인 차이가 나타남을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 이차원 NACA0012 익형에 작용하는 지면효과의 영향을 이동 벨트 장치를 이용한 실험적 연구와 상용 CFD 프로그램을 이용한 수치해석을 병행하여 수행하였다. 실험 결과로부터 이차원 익형에 작용하는 지면효과의 영향은 익형의 영각에 따라서 상이하게 나타났다. 영각이 8° 이상인 경우에는 지면효과에 의하여 양력계수가 증가하는 것이 관찰되었으나, 영각이 6° 이하에서는 지면에 근접함에 따라 오히려 양력계수의 감소가 발생하였다. 익형 표면에서의 압력계수 분포를 수치해석 결과와 비교 검토한 결과 지면 가까이에서 형성된 경계층의 영향으로 인하여 낮은 높이와 영각을 가질 때 익형 하부면에서의 압력계수 증가가 발생함을 알 수 있었다. 또한, 상부면 전연 부근에서 압력계수가 감소하는 사실을 알 수 있었으며, 결과적으로 양력의 감소가 발생하였다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 사용한 이동 벨트 장치는 경계층에 의한 유동속도의 감소를 방지할 수는 있었지만, 풍동 벽면에서 성장되어있던 경계층을 벨트의 전단부에서 제거해주지 않음으로써 실제 유동 현상을 완벽히 재현하는 데는 부족함이 있었다. 따라서, 향후 연구에서는 이동 벨트 전단부에서의 경계층 제어를 통하여 익형 전방에서 일정 유속 분포를 형성시키는 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

본 논문은 성균관대학교의 1999학년도 삼성학술연구비(과제번호: 19990119-000)에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wieselsbergem, C., 1922, Wing Resistance Near the Ground, NACA TM 77.
- (2) Tomotika, S., Nagamiya, T. and Takenouti, Y., 1933, The Lift on a Flat Plate Near a Plane Wall with Special Reference to the Effect of the Ground Upon the Lift of a Monoplane Aerofoil,

Aeronautical Research Inst., Rept. 97, Tokyo Imperial Univ., Tokyo.

- (3) Green, A. E., 1940, "The Force Acting on the Circular-arc Aerofoil in a Stream Boundary by a Plane Wall", Proceeding of London Mathematical Society, Vol. 46, pp. 19~54.
- (4) Green, A. E., 1947, "The Two Dimensional Aerofoil in a Bounded Stream", Quarterly Journal of Mathematics, Vol. 18, pp. 167~177.
- (5) Tuck, E. O., 1980, "A Nonlinear Unsteady One-dimensional Theory for Wings in Extreme Ground Effect", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 98, pp. 37~47.
- (6) Tuck, E. O., 1981, "Steady Flow and Static Stability of Aerofoils in Extreme Ground Effect", Journal of Engineering Mathematics, Vol. 15, pp. 89~102.
- (7) Chen, Y. S. and Schweikhard W. G., 1985, "Dynamic Ground Effects on a Two-Dimensional Flat Plate", Journal of Aircraft, Vol. 22, No. 7, pp. 638~640.
- (8) Nuhait, A. O. and Mook, D. T., 1989, "Numerical Simulation of Wings in Steady and Unsteady Ground Effects", Journal of Aircraft, Vol. 26, No. 12, pp. 1081~1089.
- (9) Nuhait, A. O. and Zedan, M. F., 1993, "Numerical Simulation of Unsteady Flow Induced by a Flat Plate Moving Near Ground", Journal of Aircraft, Vol. 30, No. 5, pp. 611~617.
- (10) Nuhait, A. O. and Zedan, M. F., 1995, "Stability Derivatives of a Flapped Plate in Unsteady Ground Effect", Journal of Aircraft, Vol. 32, No. 1, pp. 124~129.
- (11) Nuhait, A. O., 1995, "Unsteady Ground Effects on Aerodynamic Coefficients of Finite Wings with Camber", Journal of Aircraft, Vol. 32, No. 1, pp. 186~192.
- (12) CFD Research cooperation, 1988, CFD-ACE, Theory Manual, Ver. 5.
- (13) Jacobs, E. N. and Sherman, A., 1937, Airfoil Section Characteristics as Affected by Variation of the Reynolds Number, NACA TR-586.
- (14) Asselin, M., 1997, "An Introduction to Aircraft Performance", AIAA, pp. 141~150.